

## Определение реакций опорной поверхности на колеса трактора со стабилизацией остова

### Determination of reactions of bearing surface on the wheels of tractor with frame stabilization

Г. И. МАМИТИ<sup>1</sup>, д-р техн. наук  
М. С. ЛЬЯНОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук  
С. Х. ПЛИЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук  
А. О. ЗОКОЕВ<sup>1</sup>, инж.  
З. С. САЛБИЕВА<sup>1</sup>, инж.  
В. Б. ТЕДЕЕВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> Горский государственный аграрный университет, Владикавказ, Россия, avtofak.ggau@yandex.ru

<sup>2</sup> Юго-Осетинский государственный университет имени А. А. Тибилова, Цхинвал, Южная Осетия, tdvvd@rambler.ru

G. I. MAMITI<sup>1</sup>, DSc in Engineering  
M. S. L'YANOV<sup>1</sup>, DSc in Engineering  
S. Kh. PLIEV<sup>1</sup>, PhD in Engineering  
A. O. ZOKOEV<sup>1</sup>, Engineer  
Z. S. SALBIEVA<sup>1</sup>, Engineer  
V. B. TEDEEV<sup>2</sup>, PhD in Engineering

<sup>1</sup> Gorskiy State Agrarian University, Vladikavkaz, Russia, avtofak.ggau@yandex.ru

<sup>2</sup> A. A. Tibilov South-Ossetian State University, Tskhinval, South Ossetia, tdvvd@rambler.ru

Цель работы состоит в установлении функциональной зависимости между параметрами колесного трактора со стабилизацией остова, подвешенного на переднем и заднем мостах, характеристиками опорной поверхности и нормальными реакциями, действующими на колеса ведущего моста трактора. Новизна работы заключается в том, что в ней определяются нормальные реакции на колеса крутосклонного трактора с учетом наиболее значимых параметров трактора и опорной поверхности: стабилизируемой массы трактора (остова); нестабилизируемой массы трактора (моста); приведенной к оси заднего моста части массы остова; колеи и базы трактора; радиуса колес; координат центров стабилизируемых и нестабилизируемых масс трактора; поперечного угла наклона опорной поверхности; поперечных и радиальных деформаций колес; угла наклона оси моста. Нормальные реакции, действующие на колеса трактора, будут зависеть от режима движения вдоль склона: прямолинейного; криволинейного по конусу; криволинейного по виражу; прямолинейного с поворотом вниз; прямолинейного с поворотом вверх; криволинейного по конусу с поворотом вниз; криволинейного по конусу с поворотом вверх; криволинейного по виражу с поворотом вниз; криволинейного по виражу с поворотом вверх. Функциональные зависимости, полученные в работе для первых трех основных режимов движения, можно использовать при разработке алгоритма системы автоматической стабилизации остова трактора, подвешенного на переднем и заднем мостах. Непосредственное измерение опорных реакций на колеса трактора практически невозможно, поэтому единственно возможное решение проблемы автоматической стабилизации остова трактора, основанной на учете нормальных реакций на колеса, — их аналитическое определение, обладающее достаточной достоверностью.

**Ключевые слова:** колесный трактор; стабилизация остова; опорная поверхность; нормальная реакция; центр масс; стабилизируемая масса; нестабилизируемая масса; алгоритм; система автоматической стабилизации.

The aim of the paper is to establish the functional relationship between the parameters of a wheeled tractor with frame stabilization, suspended on front and rear axles, the characteristics of bearing surface and the normal reactions acting on the wheels of tractor driving axle. The novelty lies in the fact that the paper determines normal reactions on the wheels of a hillside tractor, taking into account the most significant parameters of the tractor and of bearing surface: stabilized tractor mass (frame); unstabilized tractor mass (axle); mass that is reduced to rear axle of frame; gauge and base of tractor; radius of wheels; coordinates of centers of stabilized and unstabilized mass of tractor; transverse slope angle of bearing surface; transverse and radial deformations of wheels; angle of inclination of axis of driving axle. The normal reactions acting on the wheels of tractor will depend on the mode of motion along the slope: linear one; curvilinear one on cone; curvilinear one on superelevation; linear one with turning down; linear one with turning up; curvilinear one on cone with turning down; curvilinear one on cone with turning up; curvilinear one on superelevation with turning down; curvilinear one on superelevation with turning up. The functional dependencies, obtained in the paper for the first three main modes of motion, can be used for the design of system algorithm for the stabilization of tractor frame

suspended on front and rear axles. Direct measurement of the bearing reactions on tractor wheels is almost impossible, therefore the only possible solution of the problem of automatic stabilization, based on the normal reactions on wheels, is their analytical determination, which is sufficiently reliable.

**Keywords:** wheeled tractor; frame stabilization; bearing surface; normal reaction; center of mass; stabilized mass; unstabilized mass; algorithm; automatic stabilization system.

## Введение

Непосредственное измерение реакций в контакте колес трактора со стабилизацией остова с опорной поверхностью вызывает непреодолимые затруднения, которые касаются, в частности, выбора мест установки датчиков, передачи информации и прочего, что влияет на точность измерений. Поэтому аналитическое решение данной проблемы представляется весьма актуальным.

## Цель исследования

Цель исследования — установление функциональной зависимости между нормальными реакциями в контакте колес трактора со стабилизацией остова, подвешенного на переднем и заднем мостах, с опорной поверхностью с учетом всех значимых параметров трактора и опорной поверхности.

## Материалы и методы

Для достижения цели исследования использованы методы теоретической механики, теории движения двухосных колесных машин, прежде всего разделов, касающихся управляемости и устойчивости движения машин.

## Результаты и их обсуждение

Значительные посевные площади горных склонов России обладают большим потенциалом для возделывания ценных с.-х. культур, что требует использования тракторов, предназначенных для горного земледелия. Применяемые методы адаптации с.-х. тракторов равнинного земледелия к условиям горного земледелия путем снижения центров тяжести остова и использования колес меньших типоразмеров не могут в полной мере обеспечить безопасность тракторов на склонах.

Мониторинг российского рынка колесных тракторов показал, что в основном предлагаются тракторы для равнинного земледелия. Это можно объяснить высокой стоимостью крутосклонных тракторов, которая напрямую связана со стоимостью их автоматических систем стабилизации остова. В свою очередь, стоимость автоматической системы стабилизации остова напрямую связана с совершенством алгоритмов его стабилизации, которые базируются на использовании источников первичной информации. Например, крутосклонный трактор МТЗ-80К и другие в качестве источников информации используют датчики крена остова (физический маятник, поплавковый датчик, или гироскоп).

Однако информации только об угле крена остова недостаточно для оценки состояния динамического равновесия трактора на склонах. Поэтому для создания эффективного алгоритма автоматической системы поперечной стабилизации остова следует рассматривать возможность использования более информативных источников — силовых факторов взаимодействия колес с опорной поверхностью [1].

Анализ развития средств механизации горного земледелия показал, что наиболее перспективное направление — создание крутосклонных колесных тракторов с

автоматическими системами стабилизации остова. При исследованиях устойчивости трактора на склонах используют методы статического равновесия. Основным критерий оценки устойчивости — предельные углы наклона остова в продольной и поперечной плоскостях, при которых соблюдаются условия статического равновесия.

В то же время для создания эффективного алгоритма системы автоматической стабилизации остова важна оценка динамического состояния трактора на склонах. С этой точки зрения наибольший интерес представляет предложение проф. Е. Д. Львова [2] оценивать динамическое состояние равновесия колесной машины на склоне по нагрузкам, приходящимся на менее нагруженные колеса.

На основании анализа исследований отечественных и зарубежных ученых сформулирована концепция создания эффективного алгоритма автоматической системы поперечной стабилизации остова колесного трактора на склонах. Суть концепции заключается в том, что динамические состояния равновесия трактора необходимо оценивать путем непрерывного измерения и анализа опорных реакций на колеса трактора, движущегося по поверхности склона [3].

Измерение сил взаимодействия в контакте колес с опорной поверхностью представляет собой сложную проблему. Ее можно решить аналитически, используя последние достижения теории устойчивости, в которой учитываются все значимые параметры колесной машины и опорной поверхности, включая приведение масс к рассматриваемой оси и отдельный учет нестабилизируемых и стабилизируемых масс колесного трактора, а также поперечную и радиальную деформации колес.

В крутосклонных тракторах вертикальное положение остова сохраняют путем использования плоскопараллельного перемещения осей ходовых колес относительно остова. Такие перемещения осей колес ограничивают быстродействие, особенно при непрерывно изменяющихся углах наклона склона.

Из большого количества схем исполнительных механизмов поперечной стабилизации остова трактора на склоне наибольший интерес представляет схема компоновки остова в виде обратного маятника. В такой схеме остова трактора подвешен на переднем и заднем мостах (рис. 1, а). Вертикальное положение остова достигается его поворотом вокруг оси, проходящей через оси шарнирных опор, с помощью гидроцилиндров (рис. 1, б).

Нормальные реакции, действующие на колеса трактора, будут зависеть от режима движения вдоль склона: прямолинейного; криволинейного по конусу; криволинейного по виражу; прямолинейного с поворотом вниз; прямолинейного с поворотом вверх; криволинейного по конусу с поворотом вниз; криволинейного по конусу с поворотом вверх; криволинейного по виражу с поворотом вниз; криволинейного по виражу с поворотом вверх.

Установим функциональные зависимости нормальных реакций  $Z_1$  и  $Z_2$  от всех значимых параметров трактора и опорной поверхности для основных режимов

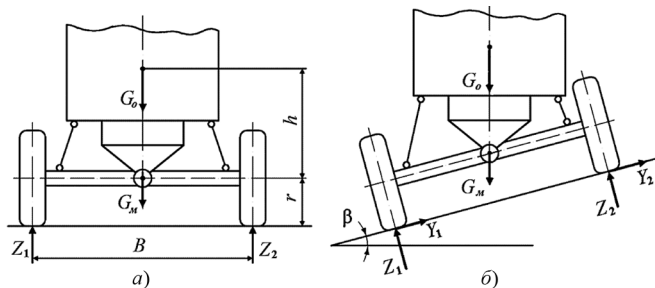


Рис. 1. Схемы крутосклонного трактора со стабилизацией остова, подвешенного на переднем и заднем мостах, на горизонтальной плоскости (а) и на склоне (б)

движения — прямолинейного вдоль склона, криволинейного по виражу и криволинейного по конусу, при которых центр нестабилизируемых масс перемещается в одной горизонтальной плоскости (на одном уровне).

### Прямолинейное движение вдоль поперечного склона

Если рассматривается поперечная устойчивость трактора, то очевидно, что менее устойчивы колеса, к которым приложен крутящий момент. Поэтому определим реакции опорной поверхности на ведущие колеса трактора (рис. 2, а).

На рисунках обозначено:  $h$  — расстояние от центра масс остова трактора до оси балки моста;  $r$  — радиус колеса;  $B$  — колея трактора;  $G_o$  — часть веса остова трактора, приходящаяся на ведущую ось;  $G_m$  — вес моста трактора (нестабилизируемая масса);  $\beta$  — поперечный угол наклона опорной поверхности;  $Z_1, Z_2$  — нормальные реакции опорной поверхности;  $Y_1, Y_2$  — поперечные реакции опорной поверхности;  $\Delta\gamma_1, \Delta\gamma_2, \Delta r_1, \Delta r_2$  — поперечные и радиальные деформации колес;  $\gamma$  — угол наклона оси моста, вызванного разными радиальными деформациями нижнего и верхнего колес [4].

Угол наклона оси моста можно определить как:

$$\gamma = (\Delta r_1 - \Delta r_2)/B.$$

Считая движение колесного трактора равномерным, найдем:

$$G_o = Ga/L,$$

где  $G$  — вес стабилизируемой массы;  $a$  — расстояние в плане от центра масс до оси передних колес;  $L$  — база

трактора (расстояние в плане между осями передних и задних колес).

Введем следующие обозначения:

$$r_o = r - (\Delta r_1 + \Delta r_2)/2;$$

$$B_1 = B/2\cos\gamma - \Delta\gamma_1;$$

$$B_2 = B/2\cos\gamma + \Delta\gamma_2.$$

Из уравнений моментов относительно центров пятен контакта колес с опорной поверхностью найдем нормальные реакции:

$$Z_1 = \{ [G_o(h\cos\beta + r_o) + G_m r_o] \sin\beta + [G_o(B_2 - h\sin\beta) + G_m B_2] \cos\beta \} / (B/\cos\gamma - \Delta\gamma_1 + \Delta\gamma_2); \quad (1)$$

$$Z_2 = \{ [G_o(B_1 + h\sin\beta) + G_m B_1] \cos\beta - [G_o(h\cos\beta + r_o) + G_m r_o] \sin\beta \} / (B/\cos\gamma - \Delta\gamma_1 + \Delta\gamma_2). \quad (2)$$

Поперечные реакции опорной поверхности:

$$Y_1 = \varphi_1 Z_1; \quad Y_2 = \varphi_2 Z_2,$$

где  $\varphi_1, \varphi_2$  — коэффициенты поперечного сцепления ведущих колес с опорной поверхностью под нижним и верхним колесами.

### Криволинейное движение по конусной поверхности

Наиболее тяжелый случай движения трактора со стабилизацией остова — движение по конусу (рис. 2, б). При этом дополнительно к действующим силам возникают центробежные силы инерции  $F_o^k$  и  $F_m^k$ , которые способствуют увеличению поперечных  $\Delta\gamma_1, \Delta\gamma_2$  и радиальных  $\Delta r_1, \Delta r_2$  деформаций, резко увеличивая в зависимости от скорости движения вероятность опрокидывания.

При равномерном движении колесной машины по дуге постоянного радиуса поперечная составляющая центробежной силы инерции [5]:

$$F = mV^2/R,$$

где  $m$  — масса машины;  $V$  — скорость движения машины;  $R$  — расстояние от центра поворота до продольной оси машины.

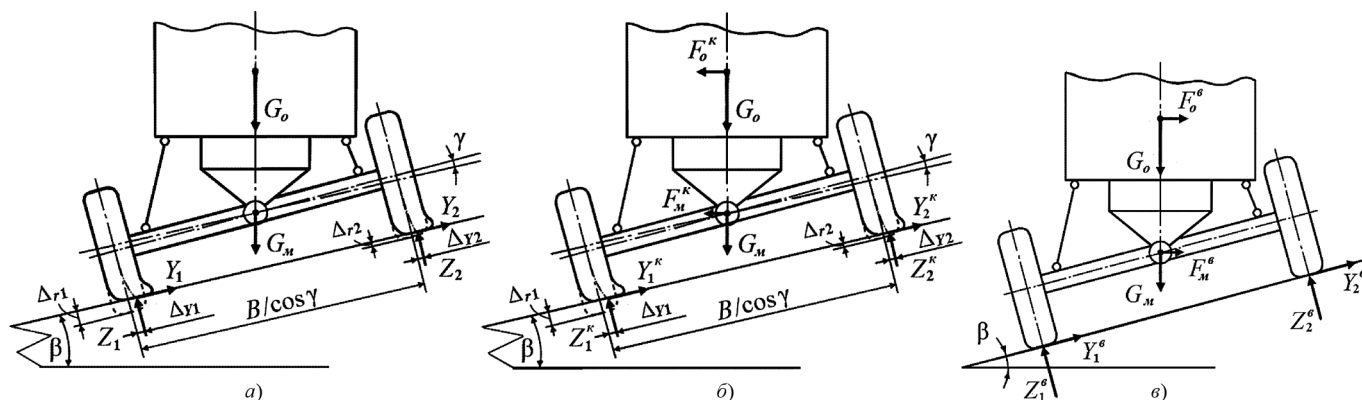


Рис. 2. Схемы сил и деформаций при движении трактора со стабилизацией остова вдоль поперечного склона (а), вдоль конусного склона (б) и в вираже (в)

В рассматриваемом случае центробежные силы инерции:

$$F_o^k = m_o V^2 / R; \quad F_M^k = m_M V^2 / R,$$

где  $m_o$  — масса остова;  $m_M$  — масса ведущего моста.

Тогда нормальные реакции  $Z_1^{F_k}$  и  $Z_2^{F_k}$ , вызванные центробежными силами  $F_o^k$  и  $F_M^k$ , возникающими при движении по конусной поверхности:

$$Z_1^{F_k} = \{ [F_o^k (h \cos \beta + r_o) + F_M^k r_o] \cos \beta - [F_o^k (B_2 - h \sin \beta) + F_M^k B_2] \sin \beta \} / (B / \cos \gamma - \Delta \gamma_1 + \Delta \gamma_2); \quad (3)$$

$$Z_2^{F_k} = -\{ [F_o^k (h \cos \beta + r_o) + F_M^k r_o] \cos \beta + [F_o^k (B_1 - h \sin \beta) + F_M^k B_1] \sin \beta \} / (B / \cos \gamma - \Delta \gamma_1 + \Delta \gamma_2). \quad (4)$$

Следовательно, при движении по конусной поверхности на колеса трактора будут действовать нормальные реакции, равные суммам выражений (1)—(4):

$$Z_1^k = Z_1 + Z_1^{F_k}; \quad Z_2^k = Z_2 + Z_2^{F_k}. \quad (5)$$

Поперечные реакции опорной поверхности:

$$Y_1^k = \varphi_1 Z_1^k; \quad Y_2^k = \varphi_2 Z_2^k.$$

### Криволинейное движение по выражу

При движении по выражу возникают центробежные силы инерции, приложенные к центрам стабилизируемых и нестабилизируемых масс колесного трактора, действующие, как и в предыдущем случае, в плоскостях вращения центров масс. В отличие от рассмотренного случая, на выраже центробежные силы инерции будут стремиться восстановить форму колес в поперечном и радиальном направлениях, что позволяет считать деформации колес пренебрежимо малыми (рис. 2, в).

Для этого случая нормальные реакции  $Z_1^{F_b}$  и  $Z_2^{F_b}$ , вызванные центробежными силами инерции  $F_o^b$  и  $F_M^b$ , возникающими при движении в выраже:

$$Z_1^{F_b} = \{ [F_o^b (B/2 - h \sin \beta) + F_M^b B/2] \sin \beta - [F_o^b (h \cos \beta + r) + F_M^b r] \cos \beta \} / B; \quad (6)$$

$$Z_2^{F_b} = \{ [F_o^b (h \cos \beta + r) + F_M^b r] \cos \beta + [F_o^b (B/2 + h \sin \beta) + F_M^b B/2] \sin \beta \} / B, \quad (7)$$

где  $F_o^b$  и  $F_M^b$  отличаются от  $F_o^k$  и  $F_M^k$  только направлением.

При движении в выраже на колеса трактора будут действовать нормальные реакции, равные суммам выражений (1), (2) и (6), (7):

$$Z_1^b = Z_1 + Z_1^{F_b}; \quad Z_2^b = Z_2 + Z_2^{F_b}. \quad (8)$$

Поперечные (боковые) реакции опорной поверхности:

$$Y_1^b = \varphi_1 Z_1^b; \quad Y_2^b = \varphi_2 Z_2^b.$$

Полученные выражения (1)—(8) для определения нормальных реакций на колеса трактора могут быть использованы при разработке алгоритма системы автоматической стабилизации остова крутосклонного колесного трактора, выполненного в виде подвешенного на переднем и заднем мостах остова.

Для трехколесного трактора со стабилизируемым вместе с передним управляемым колесом остовом можно воспользоваться полученными выше результатами с учетом работы [6].

### Выводы

Непосредственное измерение опорных реакций на колеса трактора со стабилизацией остова может быть заменено функциональными зависимостями (1)—(8), которые учитывают все значимые параметры трактора и опорной поверхности и тем самым дают более достоверные результаты. Их можно использовать при разработке алгоритма системы автоматической стабилизации остова крутосклонного трактора, выполненного в виде подвешенного на переднем и заднем мостах остова.

### Литература и источники

1. **Ким В. А.** Методология создания адаптивных САБ АТС на основе силового анализа. Могилев: Белорусско-Российский университет, 2003. 344 с.
2. **Львов Е. Д.** Теория трактора. М.: Машгиз, 1952. 384 с.
3. **Льянов М. С., Салбиева З. С.** Стабилизация остова крутосклонного колесного трактора // Известия Горского ГАУ. 2015, т. 52, ч. 4. С. 189—192.
4. **Плиев С. Х.** Расчет двухосной колесной машины на устойчивость против опрокидывания // Известия Горского ГАУ. 2015, т. 52, ч. 1. С. 124—127.
5. **Мамити Г. И.** Теория движения двухосной колесной машины. Управляемость и устойчивость: учеб. для вузов. Владикавказ: Изд-во Горского ГАУ, 2012. 168 с.
6. **Мамити Г. И., Плиев С. Х., Тедеев В. Б.** Динамический расчет устойчивости трицикла с наклоняющимся кузовом // Известия Горского ГАУ. 2015, т. 52, ч. 3. С. 144—152.

### References

1. Kim V. A. *Metodologiya sozdaniya adaptivnykh SAB ATS na osnove silovogo analiza* [Methodology of creation of adaptive systems of active safety of vehicles on the basis of power analysis]. Mogilev, Belarusian-Russian University Publ., 2003, 344 p.
2. L'vov E. D. *Teoriya traktora* [Theory of tractor]. Moscow, Mashgiz Publ., 1952, 384 p.
3. L'yanov M. S., Salbieva Z. S. Stabilization of frame of a hill-side wheeled tractor. *Izvestiya Gorskogo GAU*. 2015, vol. 52, part 4, pp. 189—192 (in Russ.).
4. Pliev S. Kh. Calculation of two-axle wheeled vehicle resistance to roll-over. *Izvestiya Gorskogo GAU*. 2015, vol. 52, part 1, pp. 124—127 (in Russ.).
5. Mamiti G. I. *Teoriya dvizheniya dvukhosnoy kolesnoy mashiny. Upravlyaemost' i ustoychivost'* [Theory of two-axle wheeled vehicle movement. Steerability and stability]. Vladikavkaz, Gorskii State Agrarian University Publ., 2012, 168 p.
6. Mamiti G. I., Pliev S. Kh., Tedeev V. B. Dynamic calculation of stability of a tricycle with tilting body. *Izvestiya Gorskogo GAU*. 2015, vol. 52, part 3, pp. 144—152 (in Russ.).